

- 9.Иорданский А.Что мы получаем со свинофермы? // Химия и жизнь. – 1988. – №1. – С.15-18.
- 10.Гюнтер Л.И. Метантенки 1981. С.52-53.
- 11.Markus Engelhart. Анаэробные биологические методы очистки моносточных вод // <http://www.enviro-chemie.ru/public/anaerob.htm>.
- 12.Материалы сайта ОФ «Флюид» Использование метанового эффлюэнта <http://www.fluid-biogas.com/biogas/effluent.html>.
13. Дубровин В.А., Таргоня В.С Ресурсы для производства биогаза и удобрений в аграрной сфере // Электронная версия материалов 2-й Междунар. конф. "Сотрудничество для решения проблемы отходов" <http://www.waste.com.ua/cooperation/2005/theses/dubrovin.html>.
- 14.Материалы сайта НПО "Агентства по возобновляемой энергетике" <http://www.rea.org.ua/index.php?page=sources&sub=2&lang=ru>.

*Получено 23.10.2006*

УДК 531.3 : 681.51

Н.А.ШУЛЬГА, А.А.БОБУХ, кандидаты техн. наук, Д.А.КОВАЛЕВ  
*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕАЛЬНЫМ ОБЪЕКТОМ ДЛЯ АДАПТАЦИИ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ**

Рассматриваются вопросы исследования динамики замкнутой системы автоматического управления реальным объектом для адаптации моделей управления путем изменения одного из параметров системы.

В условиях эксплуатации тепловые пункты с потребителями являются вероятностной системой и точно учесть влияние на тепловой баланс здания всех факторов затруднительно.

Анализ результатов исследований [1-4] позволяет утверждать, что давление теплоносителя в обратном трубопроводе системы отопления в интегрированном виде несет определенную информацию, поэтому может быть критерием оценки теплового режима здания и параметром для адаптации моделей управления [3, 4].

Для исследования динамики замкнутой системы автоматического управления давлением теплоносителя в обратном трубопроводе системы отопления необходимо иметь передаточные функции реального объекта управления  $W_o(p)$  и автоматического регулятора –  $W_p(p)$  [3]. Для получения передаточной функции реального объекта управления давлением теплоносителя в обратном трубопроводе системы отопления, т.е. фактически разомкнутой системы автоматического управления (САУ) этим давлением в виде:

$$W_o(p) = \frac{K_0 \cdot e^{-\alpha t}}{T_0 \cdot p + 1}, \quad (1)$$

где  $K_0$  – коэффициент усиления объекта;  $T_0$  – постоянная времени объекта;  $p$  – оператор Лапласа, который тождественен оператору дифференцирования ( $p \equiv \frac{d}{dt}$ );  $\alpha$  – коэффициент, определяется эксперимен-

тально;  $t$  – время запаздывания, при этом в первом приближении будем считать, что запаздывание объекта отсутствует, т.е.  $t=0$ ;

Для расчета указанных параметров передаточной функции (1) воспользуемся фактическими экспериментальными данными: средним арифметическим давлением теплоносителя в обратном трубопроводе (нормативное  $P_n = 311$  кПа; фактическое  $P_f = 295$  кПа)\*; объемом теплоносителя в трубопроводах системы отопления  $V = 0,4005$  м<sup>3</sup>; номинальным расходом теплоносителя  $F = 2310,09$  кг/час =  $0,642$  кг/с; плотностью теплоносителя  $\rho = 998$  кг/м<sup>3</sup>.

Постоянная времени объекта  $T_0$  рассчитана по формуле [3]

$$T_0 = \frac{V \cdot \rho}{F} . \quad (2)$$

Тогда

$$T_0 = \frac{0,4005 \cdot 998}{0,642} = 622,58 \text{ с} \approx 10,38 \text{ мин.} \quad (3)$$

Для определения коэффициента усиления  $K_0$  сначала определяем коэффициент самовывравнивания объекта по формуле [3]

$$\delta = \frac{P_n \cdot \Delta x}{F \cdot \Delta y} , \quad (4)$$

где  $\Delta x$  – величина возмущения по расходу теплоносителя, кг/с;  $\Delta y$  – приращение давления, кПа.

Известно [3], что при исследовании объектов допустимо максимальное увеличение расхода теплоносителя  $F_d$  на 15% больше номинального расхода, т.е.  $F_d = 1,15 \cdot F = 1,15 \cdot 0,624 = 0,738$  кг/с, тогда

$$\Delta x = F_d - F = 0,738 - 0,642 = 0,096 \text{ кг/с.} \quad (5)$$

Приращение давления  $\Delta y$  составляет:

$$\Delta y = P_n - P_f = 311 - 295 = 16 \text{ КПа.} \quad (6)$$

Тогда коэффициент самовывравнивания системы отопления  $\delta$  с учетом (4)-(6) равен:

$$\delta = \frac{311 \cdot 0,096}{0,642 \cdot 16} = 2,9 . \quad (7)$$

---

\* Экспериментальные данные получены на ПТС Дзержинского района г. Харькова и обработаны при участии Байковой К. В. и Прошуты Г. П..

Известно [3], что коэффициент усиления объекта  $K_0$  величина обратная коэффициенту самовывравнивания:

$$K_0 = 1/\delta = 1/2,9 = 0,345. \quad (8)$$

С учетом (1), (3), (8) имеем:

$$W_0(p) = \frac{0,345}{10,38 \cdot p + 1}. \quad (9)$$

Для рассматриваемого реального объекта выбираем ПИ-регулятор, передаточная функция которого в общем виде записывается [3]:

$$W_p(p) = K_p \left( \frac{1 + T_u \cdot p}{T_u \cdot p} \right), \quad (10)$$

где параметры настроек ПИ-регулятора:  $K_p$  – коэффициент усиления регулятора;  $T_u$  – время интегрирования.

Для вычисления значений параметров настроек ПИ-регулятора принимаем [3] апериодический характер изменения технологического процесса, тогда по приближенным формулам:

$$T_u = 0,6 \cdot T_0 = 0,6 \cdot 10,38 = 6,23 \text{ мин}, \quad (11)$$

а коэффициент усиления регулятора:

$$K_p = \frac{T_u}{K_0 \cdot \beta} = \frac{6,23}{0,345 \cdot 0,25} = 72,21, \quad (12)$$

где  $\beta=0,25$  – коэффициент определяемый экспериментально.

С учетом (10) получаем:

$$W_p(p) = 72,21 \left( \frac{1 + 6,23 \cdot p}{6,23 \cdot p} \right). \quad (13)$$

Для исследования динамики замкнутой САУ необходимо получить ее передаточную функцию, которая в общем виде записывается:

$$W_{CAU}(p) = \frac{W_0(p)}{1 + W_0(p) \cdot W_p(p)}. \quad (14)$$

Подставляя в (14) передаточную функцию объекта с учетом ограничений (1) и регулятора (10), получаем:

$$W_{CAU}(p) = \frac{\frac{K_0}{T_0 \cdot p + 1}}{1 + \frac{K_0}{T_0 \cdot p + 1} \cdot K_p \left( \frac{1 + T_u \cdot p}{T_u \cdot p} \right)}. \quad (15)$$

Известно [3], что судить об устойчивости замкнутой САУ можно по свободному движению этой системы, т.е. при отсутствии входных (возмущающих) воздействий, тогда характеристическое уравнение САУ представляет собой знаменатель передаточной функции этой системы:

$$1 + \frac{K_0}{T_0 \cdot p + 1} \cdot K_p \left( \frac{1 + T_u \cdot p}{T_u \cdot p} \right) = 0. \quad (16)$$

Избавляясь в уравнении (16) от знаменателя, получаем характеристическое уравнение САУ второго порядка в виде:

$$T_0 \cdot T_u \cdot p^2 + (T_u + K_0 \cdot K_p \cdot T_u) \cdot p + K_0 \cdot K_p = 0. \quad (17)$$

Соответствующие числовые значения параметров из (3), (8), (11), (12) подставляем в (17), тогда:

$$6,23 \cdot 10,38 \cdot p^2 + (6,23 + 0,345 \cdot 72,21 \cdot 6,23) \cdot p + 0,345 \cdot 72,21 = 64,67 \cdot p^2 + 161,43 \cdot p + 24,91 = 0. \quad (18)$$

Разделив (18) на коэффициент при  $p^2$ , получаем:

$$p^2 + 2,5 \cdot p + 0,39 = 0, \quad (19)$$

после чего находим корни характеристического уравнения (19):

$$r_1, r_2 = \frac{-2,5 \pm \sqrt{4,69}}{2} \quad (20)$$

$$r_1 = -0,11, \quad r_2 = -2,34.$$

Эти корни отрицательные и вещественные числа, следовательно, САУ устойчива [3].

Характеристическому уравнению (19) соответствует дифференциальное уравнение вида:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2,5 \frac{dy}{dt} + 0,39 = 0, \quad (21)$$

где  $y$  – давление теплоносителя в обратном трубопроводе системы отопления.

Решением уравнения (21) при единичном скачкообразном изменении давления [3] будет выражение:

$$y(t) = 1 + c_1 \cdot e^{r_1 t} + c_2 \cdot e^{r_2 t}, \quad (22)$$

где постоянные интегрирования  $c_1$  и  $c_2$  зависят от начальных условий и значений корней (20) характеристического уравнения (19). При нулевых начальных условиях и соответствующих значениях  $r_1$  и  $r_2$  имеем систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} c_1 + c_2 + 1 = 0 \\ -0,16c_1 - 2,34c_2 = 0, \end{cases} \quad (23)$$

из которых по соответствующим определителям

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -0,16 & -2,34 \end{vmatrix} = -2,34 + 0,16 = -2,18, \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -2,34 \end{vmatrix} = 2,34,$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ -0,16 & 0 \end{vmatrix} = -0,16$$

находим:

$$c_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{2,34}{-2,18} = -1,073; \quad c_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-0,16}{-2,18} = 0,073. \quad (24)$$

Подставив значения корней (20) и постоянные интегрирования (24) в (22), получаем:

$$y(t) = 1 - 1,073 \cdot e^{-0,16 \cdot t} + 0,073 \cdot e^{-2,34 \cdot t}. \quad (25)$$

Для получения графика переходного процесса изменения давления в обратном трубопроводе системы отопления  $y(t)$  (25), задаемся временем  $t=1,2,\dots,n$  минут, результаты вычислений сводим в табл.1. По полученным значениям строим график указанного процесса (рис.1).

Таблица 1

$t$ , мин	0	1	2	3	4
$y(t)$	0	0,09	0,22	0,34	0,43
$t$ , мин	5	6	7	8	9
$y(t)$	0,52	0,59	0,65	0,7	0,75
$t$ , мин	10	11	12	13	14
$y(t)$	0,78	0,82	0,84	0,87	0,89
$t$ , мин	15	16	17	18	19
$y(t)$	0,9	0,92	0,93	0,94	0,95
$t$ , мин	20	21	22	23	24
$y(t)$	0,956	0,963	0,968	0,973	0,977
$t$ , мин	25	26	27	28	29
$y(t)$	0,98	0,983	0,99	0,99	0,99

Анализ графика подтверждает, что характер изменения переходного процесса управления аperiodический, при этом время переходного процесса составляет 27 мин.

После этого исследуем замкнутую систему автоматического управления давлением на устойчивость по частотному критерию Ми-

хайлова [3, 5]. Для этого в характеристическом уравнении (19) оператор Лапласа  $p$  формально заменяем произведением мнимой единицы  $i$  на круговую частоту  $\omega$ :  $p=i\cdot\omega$ , в соответствующей степени, где  $i = \sqrt{-1}$ , а  $\omega$  – круговая частота,  $0 \leq \omega \leq \infty$ .

$$-\omega^2 + 2,5 \cdot i \cdot \omega + 0,38 = 0. \quad (26)$$

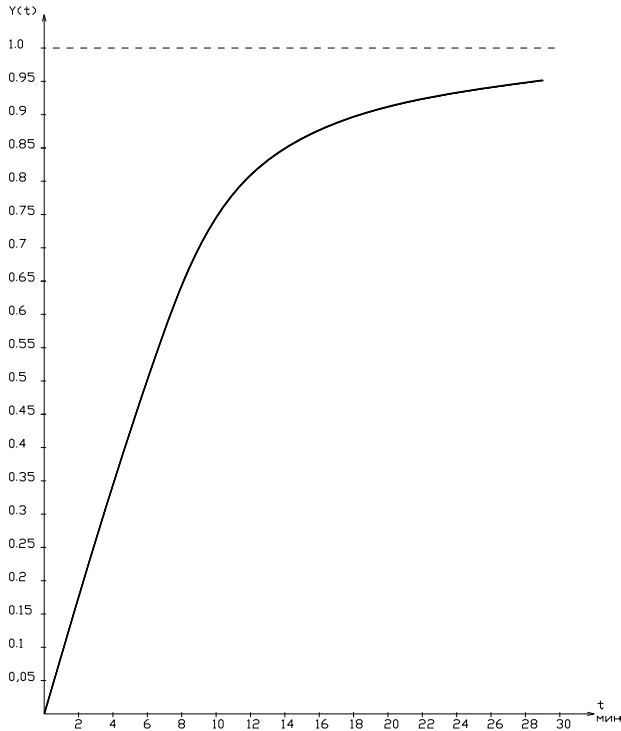


Рис.1 – Переходный процесс управления давлением в обратном трубопроводе системы отопления

Выделив в (26) вещественную и мнимую части, получаем:

$$F(\omega) = \underbrace{-\omega^2 + 0,38}_{R_e(\omega)} + i \cdot \underbrace{(2,5 \cdot \omega)}_{i \cdot I_m(\omega)}. \quad (27)$$

Задаемся круговой частотой  $0 \leq \omega \leq \infty$  и вычисляем координаты движения годографа Михайлова, результаты записываем в табл.2.

Таблица 2

$\omega$	0	0,25	0,5	0,616	0,75	
$R_e(\omega)$	0,38	0,32	0,13	0	-0,18	
$I_m(\omega)$	0	0,62	1,25	1,54	1,88	
$\omega$	1	1,25	1,5	1,75	2,0	$\infty$
$R_e(\omega)$	-0,62	-1,18	-1,87	-2,68	-3,62	$-\infty$
$I_m(\omega)$	2,5	3,12	3,75	4,38	5	$\infty$

По данным этой таблицы строим годограф Михайлова (рис.2).

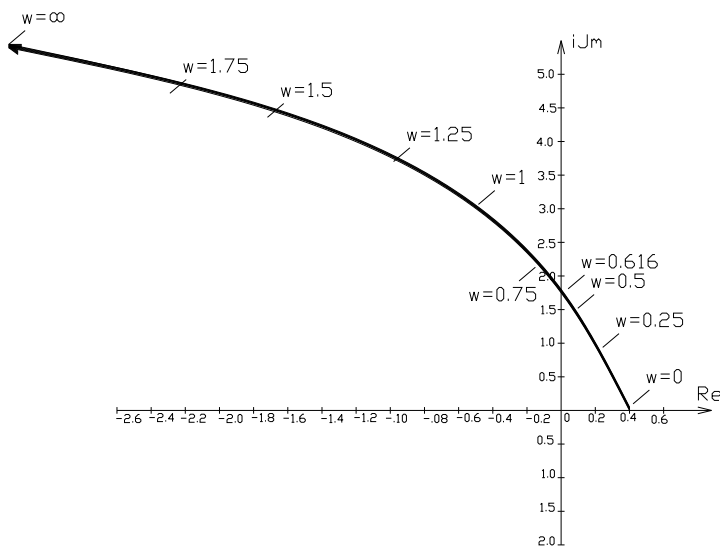


Рис.2 – Годограф Михайлова

Так как для замкнутой передаточной функции САУ второго порядка построенный годограф Михайлова последовательно, против часовой стрелки, проходит два квадранта комплексной плоскости и при этом охватывает начало координат, то исследуемая САУ является устойчивой. Полученные результаты исследования динамики замкнутой системы автоматического управления реальным объектом подтверждают возможность адаптации моделей управления путем изменения одного из параметров системы.

1.Фаликов В.С., Витальев В.П. Автоматизация тепловых пунктов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.

2.Чистович С.А., Аверьянов В.К., Темпель Ю.Я. и др. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления. – Л.: Стройиздат, 1987. – 248 с.

3.Попкович М.Г., Ковальчук О.В. Теория автоматического керування. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.

4.Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування. – К.: Задруга, 1999. – 424 с.

5.Бобух А.О. Автоматизація інженерних систем. – Харків: ХДАМГ, 2002. – 212 с.

Получено 30.10.2006

УДК 658.2.264

В.В.ГРАНКИНА, канд. техн. наук

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

## **ВНЕДРЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Рассматривается решение проблемы экономии электрической энергии в технических системах при использовании оборудования с электродвигателем за счет применения частотного регулирования их режима работы.

В коммунальных системах теплоснабжения, отопления, газоснабжения, водоснабжения и вентиляции используют оборудование, приводимое в движение электродвигателями (насосы, компрессоры, вентиляторы). Основным недостатком синхронных и асинхронных с короткозамкнутым ротором электродвигателей является постоянная частота вращения ротора электродвигателя, практически не зависящая от нагрузки. Однако подавляющее большинство систем работают в режимах с переменной нагрузкой. Для регулирования их производительности применяют различные методы, но наиболее распространенным в настоящее время является метод понижения избыточной мощности при дросселировании расхода посредством клапанов и заслонок. Такие технические решения не обеспечивают экономию электроэнергии, увеличение ресурсов работы оборудования, а также не позволяют обеспечить полную автоматизацию систем.

С развитием силовой полупроводниковой и микропроцессорной техники стало возможным создание *устройства частотного регулирования* электроприводом, которое позволяет управлять скоростью и моментом электродвигателя по заданным параметрам в точном соответствии с характером нагрузки технической системы. На рис.1 представлена одна из возможных структурных схем регулирования электроприводом.

В настоящее время особое внимание уделяется оптимизации работы электродвигателя за счет разработки системы управления силовым преобразователем функцией задания режима технической систе-